

多窃听场景下基于 RIS 辅助 UAV 系统波束形成算法

李 炎¹ 许 鹏¹ 王昱鉴¹
LI Yan XU Peng WANG Yujian

摘 要

针对多窃听场景下由于非合谋窃听者的独立性导致现有算法在求解时不易收敛的问题, 文章提出了一种非合谋的多窃听场景下基于 RIS-UAV 系统的波束形成算法。首先, 将原非凸优化问题转化为基站发射波束形成、RIS 相移波束形成和 UAV 轨迹 3 个子问题; 其次, 利用交替优化算法对子问题进行联合优化; 最后, 通过引入惩罚定理对基于传统半正定松弛算法的 RIS 相位设计进行优化。仿真结果表明, 与 SDR 算法相比, 文章所提算法在具有较高收敛性的情况下, 显著提高了系统的平均安全保密率。

关键词

无人机; 可重构智能表面; 物理层安全; 平均安全速率; 波束形成

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.09.023

0 引言

6G 拥有更广泛的设备连接和更高的数据传输速率, 传统的基于密码学的安全机制难以满足海量终端的高效安全管理需求^[1]。其次, 无线通信因其具有开放性的特点, 信号极易被未经授权的用户截取。可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 由多个低功耗的可调谐反射单元组成, 可以增强合法用户的信号强度, 抑制未经授权用户的信号接收能力, 降低信号被窃听的风险^[2]。无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 能够在空中灵活地改变位置。近年来, 提出了一种在 UAV 上安装 RIS 的新架构, 称为 ARIS^[3]。其可在高度较高的位置与地面节点建立较强的 LoS 链路, 减少与地面节点之间的信号阻塞。

近年来, 研究者们致力于研究基站 (base station subsystem, BSS) 波束形成和 RIS 相移设计的主被动波束形成联合优化问题。文献 [3] 在 RIS 下引入 UAV 的场景, 为了最大化平均安全速率, 提出一种使用连续凸近似算法 (successive convex approximation, SCA) 算法优化 UAV 轨迹和半正定松弛算法 (semi-definite relaxation, SDR) 算法优化主被动波束形成向量的交替优化算法; 文献 [4] 在 ARIS 的单窃听场景下, 考虑将 RIS 进行分割来增强合法用户处的信号同时降低窃听者窃听信号, 仿真实验表明所提出方案优于传统方案。在实际情况中, 合法用户不仅仅面临单个窃听者的威胁, 可能会面临多个窃听用户的同时监听。

因此, 研究多窃听场景下的物理层安全问题对于提高

RIS 辅助的安全通信系统至关重要。文献 [5] 考虑多窃听场景下 RIS 辅助的安全通信系统, 在保证安全速率的前提下, 联合主被动波束形成向量来最大化能源效率; 文献 [6] 考虑 ARIS 的多窃听共同窃听场景, 考虑合法用户和窃听者链路 CSI 不完全已知情况下, 通过使用交替优化算法优化 UAV 轨迹、RIS 相移和 BS 波束形成来最大化保密速率。在非合谋窃听场景中, 保密率仅受到最强窃听者的限制, 需要设计一种抑制每个窃听者都无法有效截获信息的机制, 这无疑增加了通信系统的复杂性。因此, 考虑基于多窃听者非合谋窃听的 RIS-UAV 系统十分有意义。

综上, 为避免独立的窃听者分别截获信息导致系统复杂性增加求解时不易收敛的问题^[7]。本文通过交替优化算法将主被动波束形成和 UAV 轨迹进行解耦和交替优化。对于求解 RIS 相移的模一约束, 采用基于惩罚定理的 SDR 算法 (punish semi-definite relaxation, P-SDR) 优化 RIS 相移, 解决了 SDR 算法下所得到的解通常偏离局部最优值, 无法恢复原始的 Φ , 会造成系统性能损失的问题; 同时, 引入指数变量, 线性变量的 SCA 算法对 UAV 轨迹进行优化, 改善现有算法中收敛性和复杂度高的弊端。

1 系统模型

窃听场景下 RIS-UAV 下行系统模型如图 1 所示。一个具有 L 根天线的 BS 试图向地面上的单天线 Bob 发送信息, K 个单天线 Eve 对 Bob 的通信进行拦截。其中, BS 和 Bob 之间的直接信道被阻隔。系统部署了一个具有 M 个反射单元的 RIS 搭载在 UAV 上来减少信息泄露, 保证安全通信。

1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院 辽宁沈阳 110000

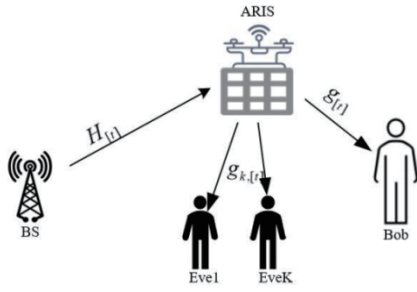


图 1 RIS 辅助 UAV 下行系统模型图

便于系统模型问题构建，将整个通信系统位于坐标系中。BS 坐标位置为 $\omega_a = [x_a, y_a, 0]^T$ ，Bob 位置坐标为 $\omega_b = [x_b, y_b, 0]^T$ ，Eve 位置坐标 $\omega_{e,k} = [x_{e,k}, y_{e,k}, 0]^T$ ($1 \leq k \leq K$)。UAV 固定飞行高度为 H ，采用时分多址 (TDMA) 方式，将 ARIS 的飞行时间 T 分为 N 个时隙，每个时隙具有相同的长度 l ，则 $T=Nl$ 。在第 n 个时隙时，UAV 携带 RIS 的坐标位置为 $q_{[n]} = [x_{[n]}, y_{[n]}, H]^T$ ，其中 $n \in 1, 2, \dots, N$ 。

Bob 和 Eve 处接收到的信号可以分别表示为：

$$y_u = g^H \Phi H x + \delta_u \quad (1)$$

$$y_e = g_k^H \Phi H x + \delta_e \quad (2)$$

式中： δ_u 、 δ_e 分别表示在 Bob 和第 k 个 Eve 处的加性高斯白噪声。

BS-ARIS，ARIS-Eve 和 ARIS-Bob 之间的信道分别表示为 $H_{[n]}$ ， $g_{[n]} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 和 $g_{k,[n]} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 。

Bob 和 Eve 的可实现的速率可分别表示为：

$$R_{u[n]} = \log_2 \left(1 + \frac{|g_{[n]}^H \Phi_{[n]} H_{[n]} p_{[n]}|^2}{\delta_u^2} \right) \quad (3)$$

$$R_{e,k[n]} = \log_2 \left(1 + \frac{|g_{k,[n]}^H \Phi_{[n]} H_{[n]} p_{[n]}|^2}{\delta_e^2} \right) \quad (4)$$

则系统的平均保密速率为：

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (R_{u[n]} - \max_k R_{e,k[n]}) \quad (5)$$

2 优化问题的提出

本文在文献 [6] 的基础上考虑多窃听者非合谋窃听的 ARIS 场景下采用基于 P-SDR 和 SCA 的交替优化算法，对主被动波束形成和 UAV 轨迹进行约束。结合所考虑的系统模型，在 UAV 每个飞行时隙内，本文构建了满足上述约束条件的最大化系统平均安全保密率的优化问题。

$$\begin{aligned}
 \text{P0:} \quad & \max_{f, \Phi, q} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_{\text{sec}[n]} \\
 \text{s.t.} \quad & \text{C1: } \|q_{[n+1]} - q_{[n]}\|^2 \leq D_{\text{max}}^2 \\
 & \text{C2: } \|p_{[n]}\|^2 \leq P_{\text{max}} \\
 & \text{C3: } |\Phi_{[n]m,m}| = 1, \forall (n, m)
 \end{aligned} \quad (6)$$

综上，由于非凸约束问题和多变量耦合，优化问题 P0 是非凸的，难以通过标准凸优化方法进行有效求解。因此本文将速率进行变换后采用了 AO 优化算法，将 P0 分解为 3 个子问题：

(1) 固定 RIS 相移 Φ 和 UAV 轨迹 q 下，通过 SCA 对基站波束形成 p 进行求解；

(2) 固定 p 和 q 下，通过 P-SDR 算法对 RIS 相移 Φ 进行迭代求解；

(3) 固定 Φ 和 p ，通过引入指数型和线型辅助变量使用 SCA 对 q 迭代求解。随着迭代次数的增加，3 个子凸优化问题将逐渐得到局部最优解。

3 问题求解

3.1 BS 波束形成设计

固定 UAV-RIS 轨迹 $q_{[n]}$ 和 RIS 相移 $\Phi_{[n]}$ ，对基站发射波束形成 $p_{[n]}$ 进行优化。

将公式 (3~4) 进行变换后得到新的公式：

$$\begin{aligned}
 R_{u[n]} &= \log_2 \left(1 + \frac{|g_{[n]}^H \Phi_{[n]} H_{[n]} p_{[n]}|^2}{\delta_u^2} \right) \\
 &= 1 \log_2 \left(1 + \frac{|p_{[n]} p_{[n]}^H A_{[n]}|}{\delta_u^2} \right) \\
 &= \log_2 \{ 1 + \gamma_u \text{tr}(P_{[n]} A_{[n]}) \}
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{同理, } R_{e,k[n]} = \log_2 \left(1 + r_e \text{tr}(P_{[n]} B_{k,[n]}) \right) \quad (8)$$

式中： $A_{[n]} = (\Phi_{[n]}^H H_{[n]} g_{[n]})(g_{[n]}^H H_{[n]} \Phi_{[n]})$ ， $B_{k,[n]} = (g_{k,[n]}^H \Phi_{[n]} H_{[n]})(\Phi_{[n]}^H H_{[n]} g_{k,[n]})$ ， $\gamma_u = \frac{1}{\delta_u^2}$ ， $\gamma_e = \frac{1}{\delta_e^2}$ ， $P_{[n]} = P_{[n]} P_{[n]}^H$ ， $P_{[n]}$ 为半正定矩阵，需要满足

$P_{[n]} \geq 0$ ， $\text{rank}(P_{[n]})=1$ 。

原问题 P0 变为：

$$\begin{aligned}
 \text{P1:} \quad & \max_{t_{[n]}} \frac{1}{N} (R_{u[n]} - R_{e,k[n]}) \\
 \text{s.t.} \quad & \text{C4: } \text{tr}(P_{[n]}) \leq P_{\text{max}} \\
 & \text{C5: } F_{[n]} \geq 0
 \end{aligned} \quad (9)$$

引入辅助变量 $t_{1[n]}$ ，令 $t_{1[n]} = \max R_{e,k[n]}$ ， $R_{\text{sec}[n]} = \log_2 (1 + \gamma_u \text{tr}(P_{[n]} A_{[n]})) - t_{1[n]}$ 。

P1 问题转化为：

$$\begin{aligned}
 \text{P1.1:} \quad & \max_{t_{[n]}, A_{[n]}} \frac{1}{N} [\log_2 (1 + \gamma_u \text{tr}(P_{[n]} A_{[n]}) - t_{1[n]})] \\
 \text{s.t.} \quad & \text{C4: } \text{tr}(P_{[n]}) \leq P_{\text{max}} \\
 & \text{C5: } P_{[n]} \geq 0 \\
 & \text{C6: } t_{1[n]} \geq \log_2 (1 + \gamma_e \text{tr}(B_{k,[n]} W_{[n]}))
 \end{aligned} \quad (10)$$

对 $t_{1[n]}$ 进行一阶泰勒展开，将复杂的非凸对数函数近似为线性函数，从而将原始的非凸优化问题转化为凸优化问题：

$$t_{1[n]} \geq \log_2(1 + \gamma_e \text{tr}(B_{e,k[n]} \tilde{P}_{[n]})) + \frac{\gamma_e \text{tr}(B_{e,k[n]}(\mathbf{P}_{[n]} - \tilde{P}_{[n]}))}{\ln 2(1 + \gamma_e \text{tr}(B_{e,k[n]} \tilde{P}_{[n]}))} \quad (11)$$

因此，问题 (P1.1) 可以转化为问题 (P1.2) 表示为：

$$\begin{aligned} \text{P1.2: } & \max_{\tilde{P}_{[n]}, A_{[n]}} \frac{1}{N} [\log_2(1 + r_u \text{tr}(\mathbf{P}_{[n]} A_{[n]})) - t_{1[n]}] \\ \text{s.t. } & \text{C4, C5} \\ & \text{C7: } t_{1[n]} \geq \log_2(1 + \gamma_e \text{tr}(B_{e,k[n]} \tilde{P}_{[n]})) + \frac{\gamma_e \text{tr}(B_{e,k[n]}(\mathbf{P}_{[n]} - \tilde{P}_{[n]}))}{\ln 2(1 + \gamma_e \text{tr}(B_{e,k[n]} \tilde{P}_{[n]}))} \end{aligned} \quad (12)$$

将式 (12) 所得代入 P1.2 中得到目标函数，即优化问题 P1.2 转变为凸优化问题，可利用凸优化求解器求解。

3.2 RIS 相移的设计

固定 UAV-RIS 轨迹 $q_{[n]}$ 和基站发射波束成形 $\mathbf{P}_{[n]}$ ，对 RIS 相移 $\Phi_{[n]}$ 进行优化。令 $\mathbf{v}_{[n]} = [e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}]^H$ ，将式 (3~4) 进行公式变换为：

$$\begin{aligned} R_{u[n]} &= \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{g}_{[n]}^H \Phi_{[n]} H_{[n]} \mathbf{P}_{[n]}|^2}{\sigma_u^2} \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{v}_{[n]} C_{[n]} \mathbf{v}_{[n]}^H|}{\sigma_u^2} \right) \\ &= \log_2(1 + \gamma_u \text{tr}(C_{[n]} V_{[n]})) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{同理， } R_{e,k[n]} = \log_2(1 + \gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]} V_{[n]})) \quad (14)$$

式中： $C_{[n]} = (\text{diag}(\mathbf{g}_{[n]}^H H_{[n]} \mathbf{P}_{[n]})) (\text{diag}(\mathbf{g}_{[n]}^H H_{[n]} \mathbf{P}_{[n]}))$ ， $V_{[n]} = \mathbf{v}_{[n]} \mathbf{v}_{[n]}^H$ ， $V_{[n]}$ 满足 $V_{[n]} \geq 0$ ， $\text{rank}(V_{[n]})=1$ ，则 P0 问题转化为：

$$\begin{aligned} \text{P2: } & \max_{V_{[n]}, t_{2[n]}} \frac{1}{N} (\log_2(1 + \gamma_u \text{tr}(C_{[n]} V_{[n]}) - R_{e,k[n]}) \\ \text{s.t. } & \text{C8: } \mathbf{v}_{[n]} = \mathbf{I}_M, \forall (n, m) \\ & \text{C9: } V_{[n]} \geq 0 \\ & \text{C10: } \text{rank}(V_{[n]}) = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

引入辅助变量 $t_{2[n]}$ ，令 $t_{2[n]} = \max_k R_{e,k[n]}$ ，则 $R_{\text{sec}[n]} = \log_2(1 + \gamma_u \text{tr}(C_{[n]} V_{[n]})) - t_{2[n]}$ ，则有：

$$\begin{aligned} \text{P2.1: } & \max_{V_{[n]}, t_{2[n]}} \frac{1}{N} [\log_2(1 + \gamma_u \text{tr}(C_{[n]} V_{[n]}) - t_{2[n]})] \\ \text{s.t. } & \text{C8, C9, C10} \\ & \text{C11: } t_{2[n]} \geq \log_2(1 + \gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]} V_{[n]})) \end{aligned} \quad (16)$$

由于非凸秩一约束，问题 (P2.1) 仍然是一个非凸优化问题。接下来，引入如下命题处理这个秩一约束。

命题一： $\text{tr}(\mathbf{V}) \geq 0$ ，秩一约束可以表示为两个凸函数之差，即：

$$\text{rank}(\mathbf{V}_{[n]}) = 1 \Leftrightarrow \text{tr}(\mathbf{V}_{[n]}) - \|\mathbf{V}_{[n]}\|_2 = 0 \quad (17)$$

式中： $\text{tr}(\mathbf{V})$ 表示矩阵 $\mathbf{V}$ 的迹之和； $\|\mathbf{V}\|_2$ 表示 $\mathbf{V}^T \mathbf{V}$ 的最大特征值开方根。

根据命题一，将矩阵 $\mathbf{V}$ 上的非凸秩一约束进行变换，然

后将其作为惩罚项添加到问题 (P2.1) 的目标函数中。因此，问题 (P2.1) 可以转化为问题 (P2.2) [8]：

$$\begin{aligned} \text{P2.2: } & \max_{V_{[n]}, t_{2[n]}} \frac{1}{N} [\log_2(1 + r_u \text{tr}(C_{[n]} V_{[n]}) - t_{2[n]}) - \varsigma (\text{tr}(\mathbf{V}_{[n]}) - \|\mathbf{V}_{[n]}\|_2)] \\ \text{s.t. } & \text{C8, C9} \\ & \text{C11: } t_{2[n]} \geq \log_2(1 + \gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]} V_{[n]})) \end{aligned} \quad (18)$$

式中： ς 表示与秩一约束相关的惩罚因子； $\|\mathbf{V}\|_2$ 表示相对于 $\mathbf{V}$ 的凸函数。

由于 P2.2 中目标函数和约束的非凸性，需要将对 $V_{[n]}$ 和 $t_{2[n]}$ 其使用一阶泰勒展开得到其解为：

$$\begin{aligned} \|\mathbf{V}\|_2 &\geq \|\mathbf{V}^{(r)}\|_2 + \text{tr} \left(m_{\max}(\mathbf{V}^{(r)}) m_{\max}(\mathbf{V}^{(r)})^H - (\mathbf{V} - \mathbf{V}^{(r)}) \right) \\ &\triangleq (\|\mathbf{V}\|_2)^b \end{aligned} \quad (19)$$

$$t_{2[n]} \geq \log_2(1 + \gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]} \tilde{V}_{[n]})) + \frac{\gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]}(\mathbf{V}_{[n]} - \tilde{V}_{[n]}))}{\ln 2(1 + \gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]} \tilde{V}_{[n]}))} \quad (20)$$

式中： $m_{\max}$ 表示在第 r 次迭代中对应于矩阵 $\mathbf{V}$ 的最大奇异值的特征向量。因此，问题 (P2.2) 可以近似转化为：

$$\begin{aligned} \text{P2.3: } & \max_{V_{[n]}, t_{2[n]}} \frac{1}{N} [\log_2(1 + r_u \text{tr}(C_{[n]} V_{[n]}) - t_{2[n]}) - \varsigma (\text{tr}(\mathbf{V}) - (\|\mathbf{V}\|_2)^b)] \\ \text{s.t. } & \text{C8, C9} \\ & \text{C12: } t_{2[n]} \geq \log_2(1 + \gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]} \tilde{V}_{[n]})) + \frac{\gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]}(\mathbf{V}_{[n]} - \tilde{V}_{[n]}))}{\ln 2(1 + \gamma_e \text{tr}(D_{e,k[n]} \tilde{V}_{[n]}))} \end{aligned} \quad (21)$$

可以看出，该问题是一个标准的半正定规划问题，可以使用 CVX 工具箱求解。

3.3 优化 UAV-RIS 轨迹

固定 RIS 相移波束成形 $\Phi_{[n]}$ 和基站发射波束成形 $\mathbf{P}_{[n]}$ ，对 UAV-RIS 轨迹 $q_{[n]}$ 进行优化。

$$\begin{aligned} R_{u[n]} &= \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{g}_{[n]}^H \Phi_{[n]} H_{[n]} \mathbf{P}_{[n]}|^2}{\delta_u^2} \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{|C_0 d_0^2 \mathbf{g}_{e,k[n]}^H \Phi_{[n]} H_{[n]} \mathbf{P}_{[n]}|^2}{\delta_u^2 d_{\text{Rb}[n]}^2 d_{\text{AR}[n]}^2} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{同理有: } R_{e[n]} = \log_2 \left(1 + \frac{|C_0 d_0^2 \mathbf{g}_{e,k[n]}^H \Phi_{[n]} H_{[n]} \mathbf{P}_{[n]}|^2}{\delta_e^2 d_{\text{Re},k[n]}^2 d_{\text{AR}[n]}^2} \right) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \text{将 (22) (23) 整理变换有 } R_{u[n]} = \log_2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{d_{\text{Rt}[n]}^2 d_{\text{AE}[n]}^2} \right), \\ & R_{e[n]} = \log_2 \left(1 + \frac{Z_{k[n]}}{d_{\text{Re},k[n]}^2 d_{\text{AR}[n]}^2} \right), \text{ 引入辅助变量, 令 } t_{3[n]} = \end{aligned}$$

$\max R_{e,k[n]}$ ，由于 (P0) 的非凸性，难以最优解，引入线性辅助变量 $x_{1[n]}$ ， $x_{2[n]}$ ，且 $x_{1[n]}$ 和 $x_{2[n]}$ 满足 $x_{1[n]} \geq d_{\text{Rb}[n]}^2$ ， $x_{2[n]} \geq d_{\text{AR}[n]}^2$ 和指数型辅助变量 $e^{-y_{1,k[n]}}$ 和 $e^{-y_{2[n]}}$ ，且 $e^{-y_{1,k[n]}}$ 和 $e^{-y_{2[n]}}$ 满足 $e^{-y_{1,k[n]}} \leq d_{\text{Re},k[n]}^2$ ， $e^{-y_{2[n]}} \leq d_{\text{AR}[n]}^2$ ，新的相关约束表示为：

$$\begin{aligned} \text{C13: } & x_{1[n]} \geq \|q_{[n]} - \omega_u\|^2 + H^2 \\ \text{C14: } & x_{2[n]} \geq \|q_{[n]} - \omega_e\|^2 + H^2 \\ \text{C15: } & e^{-y_{1,k[n]}} \leq \|q_{[n]} - \omega_k\|^2 + H^2 \\ \text{C16: } & e^{-y_{2[n]}} \leq \|q_{[n]} - \omega_a\|^2 + H^2 \end{aligned} \quad (24)$$

因此, P0 问题可以转换为:

$$\begin{aligned} \text{P3:} \quad & \max_{t_{3[n]}, q, x_{1[n]}, x_{2[n]}, y_1, y_2} \frac{1}{N} \left(\log_2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{X_{1[n]} X_{2[n]}} \right) - t_{3[n]} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1, C13, C14, C15, C16} \\ & \text{C17: } t_{3[n]} \geq \log_2 \left(1 + Z_{k[n]} e^{y_{1[n]} + y_{2[n]}} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

显然 P3 仍是非凸的。为了解决这一问题, 应用 SCA 获得收敛解。通过运用一阶泰勒表达式求得 $d_{AR[n]}$ 、 $d_{RU[n]}$ 和 $t_{3[n]}$ 。

在第 i 次迭代时的下界为:

$$\begin{aligned} \text{C18: } e^{-y_{1, i[n]}} &\leq \|\tilde{q}_{[n]} - \omega_k\|^2 + 2(\tilde{q}_{[n]} - \omega_k)^H (q_{[n]} - \tilde{q}_{[n]}) + H^2 \\ \text{C19: } e^{-y_{2, i[n]}} &\leq \|\tilde{q}_{[n]} - \omega_a\|^2 + 2(\tilde{q}_{[n]} - \omega_a)^H (q_{[n]} - \tilde{q}_{[n]}) + H^2 \\ \log_2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{x_{1, i[n]} x_{2, i[n]}} \right) &\geq \log_2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}} \right) + \frac{\frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]}^2 \tilde{x}_{2, i[n]}} (x_{1, i[n]} - \tilde{x}_{1, i[n]})}{\ln 2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}} \right)} + \frac{\frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}^2} (x_{2, i[n]} - \tilde{x}_{2, i[n]})}{\ln 2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}} \right)} \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}} \right) - \frac{S_{[n]} (x_{1, i[n]} - \tilde{x}_{1, i[n]})}{\tilde{x}_{1, i[n]}^2 \tilde{x}_{2, i[n]} \ln 2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}} \right)} - \frac{S_{[n]} (x_{2, i[n]} - \tilde{x}_{2, i[n]})}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}^2 \ln 2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}} \right)} \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]}} \right) - \frac{S_{[n]} (x_{1, i[n]} - \tilde{x}_{1, i[n]})}{\tilde{x}_{1, i[n]} \ln 2 (\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]} + S_{[n]})} - \frac{S_{[n]} (x_{2, i[n]} - \tilde{x}_{2, i[n]})}{\tilde{x}_{2, i[n]} \ln 2 (\tilde{x}_{1, i[n]} \tilde{x}_{2, i[n]} + S_{[n]})} \end{aligned} \quad (26)$$

将其代入问题 P3 中, 则优化问题可以转换为:

$$\begin{aligned} \text{P3.1:} \quad & \max_{q, x_{1, i[n]}, x_{2, i[n]}, y_1, y_2, t_{3, i[n]}} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\log_2 \left(1 + \frac{S_{[n]}}{x_{1, i[n]} x_{2, i[n]}} \right) - t_{3, i[n]} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1, C13, C14, C15, C16} \\ & \text{C20: } t_{3, i[n]} \geq \log_2 \left(1 + Z_{k[n]} e^{y_{1, i[n]} + y_{2, i[n]}} \right), \forall (k, n) \end{aligned} \quad (27)$$

问题 P3.1 变成一个凸优化问题, 可通过凸优化工具箱 (CVX) 求解。

3.4 算法流程

具体的步骤算法如表 1 所示。

表 1 算法流程

初始化: $\mathbf{p}^{(0)}$ 、 $\Phi^{(0)}$ 、 $q^{(0)}$, 收敛精度 δ , 迭代次数 i , 最大迭代次数 $i_{\max}$

While $i \leq i_{\max}$ do;

迭代次数 $i=i+1$;

设置 $q=q^{(i-1)}$, $\mathbf{v}=\mathbf{v}^{(i-1)}$ 求解问题式 (11) 得到基站发射波束成形向量优化 $\mathbf{p}$;

设置 $\mathbf{p}^{(i-1)}$, $q^{(i-1)}$ 求解问题式 (20) 得到 RIS 优化波束成形向量优化值 $\mathbf{v}^{(i)}$;

4 仿真分析

4.1 仿真参数设置

在本节中, 通过仿真实验验证所提出算法的性能。BS 的天线数量为 $L=6$; BS 位置为 $(-70, 50)$; Bob 位置为 $(70, 50)$; k 个 Eve 随机分布于位置为 $(-100, 20)$ 、 $(100, 20)$ 、 $(-100,$

$-20)$ 、 $(100, -20)$ 的正方形区域内。BS-RIS、RIS-Bob 和 RIS-Eve 之间的信道均为莱斯衰落信道, 其莱斯因子设置为 $\beta=30$ dB。

4.2 仿真结果分析

图 2 为所提算法的平均安全速率在不同 BS 发射功率和 RIS 单元数随迭代次数的变化曲线。随着迭代次数的增加, 系统平均安全速率逐渐趋于平稳, 表明算法在不同参数下都能收敛到一个稳定的平均安全速率可以看出, 当 $P_{\max}$ 和 M 增加时, 系统平均安全速率显著提高, 这说明增加 $P_{\max}$ 和 RIS 单元的数量有助于提升系统的性能。

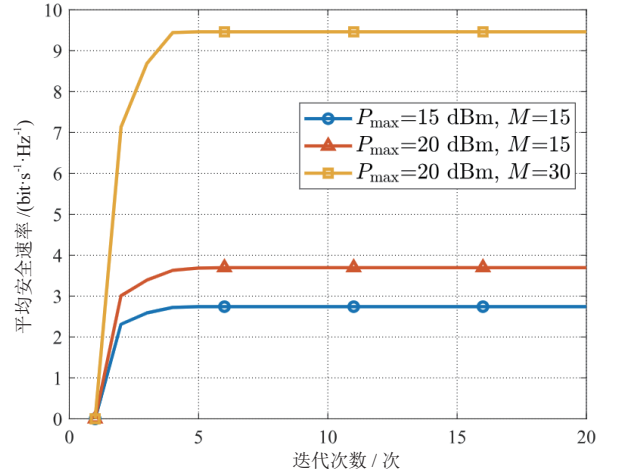


图 2 不同参数下的算法收敛性能比较

图 3 给出了所提算法的平均安全速率在不同优化的算法下, RIS 单元数量对系统平均安全速率的影响。随着 RIS 单元数量的增加, 所有方案的平均安全速率普遍上升。所提出的方案优于对比方案。考虑实际情况, RIS 连续相移成本高且设计复杂, 采用相移量化法离散 RIS 相移值^[9]。结果显示, 连续相移算法优于离散和随机相移算法, 1 位移相器的离散相移持续优于随机相移, 2 位移相器获得更好的性能^[10]。同时, P-SDR 算法在 SDR 基础上引入了惩罚定理, 使其能更好地有效地接近全局最优解。

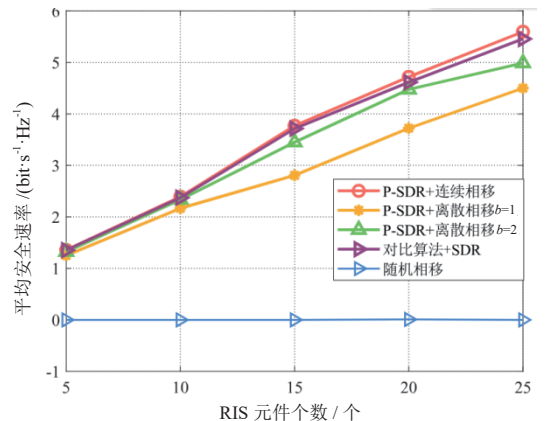


图 3 平均安全速率随 RIS 单元数量的变化

图4给出了所提算法的平均安全速率在不同优化的算法下,基站最大发射功率对系统平均安全速率的影响。随着基站最大发射功率的增加,本文提出的优化方案在平均安全速率方面优于其他方案。相比SDR方法,P-SDR算法在约束条件下,能够更好地引导优化过程,能够更精确地逼近最优解,同时能够保证更好的性能。同时,相比于随机相位和离散相位方案,本文算法保密性能明显更优。

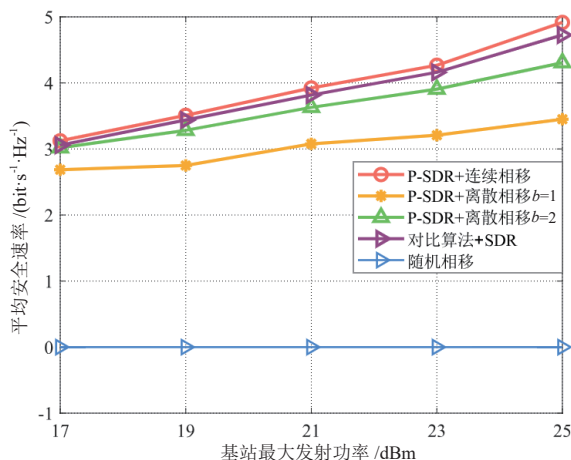


图4 平均安全速率随基站最大发射功率的变化

5 结语

本文提出一种非合谋的多窃听场景下RIS辅助UAV系统的波束形成算法。通过联合优化UAV飞行轨迹、RIS相移和基站波束形成,最大化通信系统平均安全速率。针对保密速率最大化问题的非凸性和多变量耦合性,通过AO交替优化3个子问题,同时,引入惩罚定理对传统SDR优化RIS相移算法进行改进,有效解决了传统算法的局部最优解和计算复杂度高的问题。仿真结果表明,本文所提方案收敛性高,且和传统方案相比,所提方案实现了更高的保密速率。

参考文献:

- [1] 姚嘉铨,许威,黄永明,等.基于可重构智能表面的6G通信技术[J].信号处理,2022,38(8):1555-1567.
- [2] 马向进,韩家奇,乐舒瑶,等.可重构智能超表面设计及其无线通信系统应用[J].无线电通信技术,2022,48(2):258-268.
- [3] PANG X W, ZHAO N, TANG J, et al. IRS-assisted secure UAV transmission via joint trajectory and beamforming design[J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(2): 1140-1152.
- [4] ARZYKULOV S, CELIK A, NAURYZBAYEV G, et al. Analyzing and minimizing secrecy outage

in aerial RIS-enhanced physical layer security[C//OL]//2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE, 2023[2024-06-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10464502>. DOI:10.1109/GCWkshps58843.2023.10464502.

- [5] WANG Q, ZHOU F H, HU R Q, et al. Energy efficient robust beamforming and cooperative jamming design for IRS-assisted MISO networks[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 20(4): 2592-2607.
- [6] ADAM A B M, OUAMRI M A, WAN X Y, et al. Secure communication in UAV-RIS-empowered multiuser networks: joint beamforming, phase shift, and UAV trajectory optimization[J]. IEEE systems journal, 2024, 18(2): 1009-1019.
- [7] 钱丙会. 基于可重构智能表面的毫米波安全通信研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2024.
- [8] LI Z D, CHEN W, CAO H Q. Beamforming design and power allocation for transmissive RIS-based transmitter architectures[J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(1): 53-57.
- [9] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[C]// ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE, 2019: 7830-7833.
- [10] 王晓辉, 许鹏, 常文慧, 等. IRS辅助的毫米波MIMO系统多目标波束赋形算法[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(3): 124-129.

【作者简介】

李炎(2000—),女,河北唐山人,硕士研究生,研究方向:智能无线网络。

许鹏(1981—),男,辽宁沈阳人,博士,副教授,研究方向:未来移动通信关键技术。

王昱鉴(2005—),女,辽宁辽阳人,本科,研究方向:智能无线网络。

(收稿日期:2025-02-08 修回日期:2025-09-01)